

構造物の点検・モニタリング技術

Monitoring Technologies for Civil Engineering and Building Structures

三 浦 悟 畑 田 朋 彦 今 井 道 男

I. はじめに

サステナブル社会の実現のために、健全な社会インフラの維持は極めて重要な課題である。2012年12月の崩落事故を受け、「今後、笹子トンネルの事故のようなことは日本のインフラからは発生させない」というメッセージとともに、2013年がインフラメンテナンス元年と位置づけられた。ここから維持管理の重要性が社会的に強く認識され始めたわけだが、具体的にどのような状況が維持されれば良いのだろうか。

現在、インフラの維持管理の出発点—すなわち現状認識の基本は、規定（点検要領）に基づいて実施された点検やモニタリングに基づく4段階の健全性評価（Table 1）の結果である。それは、定期点検の要領と同じ手法で実施されるインフラ総点検によって国内のインフラの現状を把握しようとしていることから明らかである。

Table 1 健全性判定区分
(Judgment Classification of Structural Soundness)

区分	状態
I 健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II 予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III 早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV 緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生ずる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

その結果として判明した健全性I～IVの内、IIIとIVの構造物がないという状態が我が国のインフラのあるべき姿の第一段階の具体的な目標と考えられる。すなわち、危険性の高い構造物をなくすことである。

第二段階としては、将来的に継続してIIIとIVの構造物を出さない、すなわち、すべてのインフラをII以下に維持しておくことであると考える。将来の維持管理の考え方として、『インフラの健全性を維持するためには、これまでのような事後保全（壊れたところを修理修繕する管理方法）から、壊れる前に少ない予算で修理修繕しておく予防保全に変えていくことが必要である。』という指摘がいろいろなところからなされてきた。しかし、現在においても具体的に何をどうすれば良いのか、その基準やその効果を分かり易く示すことができているとは言い難い。そこで、ここでは健全性判定区分のIIIに至らせない活動を「予防保全」とは言い換え、そのために必要なこと、特に、点検・モニタリング技術の方向性に関して述べていきたいと思う。

健全性IIIに至らせない活動を予防保全とするならば、適切な予防保全を進めるためには、健全性IIの構造物に対して健全性IIIに至る危険性を正確かつ詳細に評価することが必要となる。すなわち、健全性IIからIIIになりそうな対象かどうか、また、IIIに至るまでの時

間や条件はどうか、といったこれまでは不明確であった事項を明確にすることがきわめて重要である。

また、Table 1の健全性I、III、IVのクラス分けに比べ、IIのグレードに属する構造物を的確に評価することは、判定区分の定義からも容易ではないことが推測される。現在地方自治体の維持管理の問題点の一つとされる「点検してもその結果を評価できない」のは、この健全性レベルIIの構造物に対するものが圧倒的に多い。すなわち、どこから対策して良いか分からなくなるのである。したがって、前述した予防保全を的確に実施するための点検やモニタリング技術には、健全性IIのグレードを現状よりきめ細かく評価することができ、しかも、誰もが効率よく使える技術が必要となると考えられる。

これらを踏まえると、サステナブル社会における社会インフラのあるべき姿としては、インフラ構造物の安全性・健全性維持や長寿命化対策の活動が社会システムとして回っていることが挙げられる。そのような社会の実現に必須となる「予防保全」を前提とした維持管理サイクルにおいて、インフラの状態変化を把握することは最も重要な要素である。モニタリング技術は、構造物の状態を定期的、不定期的、あるいは常時に計測し、インフラの状態及び状態変化を客観的に把握する技術である。

従来から、損傷の有無、程度・位置を見出し構造物の状態を評価するため、例えば、橋梁定期点検要領(案)(平成16年3月・国交省)、道路トンネル点検要領(案)(平成14年4月・国交省)、総点検実施要領(案)(平成25年2月・国交省)などに基づく点検が実施されてきた。しかし、多くの市区町村では、技術系の人員不足により点検自体が十分にできていないことや、点検しても結果を評価できないといった問題が指摘されている。また、構造物の劣化の程度を正確に評価し、修繕・更新時期を判断するためには、これまでの点検要領で基本となっている目視点検を実施できない部位の点検や、目視では評価が困難な内部を調べるための非破壊検査技術の高度化などが重要になる。外観の変状が生じていない段階で構造物に生じる状態の変化を常に把握することによって、より詳細に構造物の状態や残余耐力などが分かり、補修や対策工などの検討まで行うことができれば、画期的な維持管理技術となるだろう。

モニタリングが必要なのは既設構造物ばかりでない。新設構造物の初期品質の確保を評価するための手段としての活用も重要である。初期欠陥の防止のために、例えば、施工中の品質管理のためにモニタリングを使用することも有効な手段となり得る。このほか、設計照査項目を計測することによって設計品質が確保できているかを判定することや、その計測結果を設計にフィードバックして照査式や判定基準の変更に対する情報として役立てることが非常に重要であると考えられる。この考え方は、補修・補強の設計と実施結果としての効果確認、その後の劣化診断から補修・補強技術の適否評価のフィードバックループの構築にも応用できるものである。

また、性能評価型設計において、地震などに対して財産の保全を図る「復旧性(修復性)」が構造物への要求性能の一つとして掲げられている。復旧性とは、地震後の構造物の補修に要する費用・期間すなわち構造物の損傷度に関係するものであるが、地震後に構造物に残留する変位(変形)が判断基準の一つとなっている。通常、残留変位(変形)は地震後に実施される被災度判定検査の一環として計測されているが、これをモニタリング技術によって代替できれば、その必要性は一段と高まると考えられる。

このようにモニタリングデータを新設構造物の設計や補修・補強工事の設計にフィードバックすることは、本質的にインフラの安全性・健全性維持や長寿命化に直結するものと考えられる。キーワードは、「構造設計と維持管理システムの統合」である。

II. モニタリングに必要な技術

1. 調査・点検技術－検査装置と自動化・ロボット技術

社会インフラの長寿命化を推進する上で必須となる予防保全を確実に実施するためには、調査・点検データから、損傷の有無、程度・位置を見出し、構造物の状態を正確に評価することが必要となる。

まず、調査・点検を効率よく確実に実施できる技術が必要である。

具体的には、現状多くの調査・点検作業で行われている「目視点検」、「打音検査」などの経験的方法の定量化と、「非破壊検査」のより一層の効率化(標準化、低コスト化など)、高性能化(精度向上、自動データ判定など)が重要であると考えられる。

また、調査・点検作業は人手によって行うことを前提としているが、人が立ち入ることが困難な場所や、足場などの設備が必要となるような部位での作業の効率化に対しては、機械化、自動化、ロボット化などの対応策が必要となる。例えば、現在でも人が入れない下水管渠の調査には、電動走行台車に計測装置を搭載して、外部からの操作によって点検するシステムが使用されているし、最近では、カメラを搭載したラジコンヘリによって足場の設置を不要とする調査システムなどが開発されている。

ロボットの開発には、必要とする作業自体の検討のほか、調査・点検場所に到達するための機構や搭載する計測装置などの動作環境を検討する必要がある。また、ロボット本体とは別に、ロボットを導入しやすい構造や設備、環境の検討も重要であると考えられる。例えば、ある個所にワイヤを架けるだけでロボットが移動できるようになることは十分考えられる。将来的には、調査・点検ロボットの稼働を前提とした構造設計の検討が必要であると考えられる。

2. 定置型：モニタリングシステム(常時観測)

構造物の劣化現象は、短期で急激に発生する事象ではないため、基本的には点検は数年に一度程度の実施で十分であると考えられる。しかし、点検に基づいて健全性を評価した結果は、すぐに補修が必要なものと補修の必要がない高い健全性を有するものだけではない。通常、多くの構造物はその間に属することになる。その中には、次の調査点検時までには危険領域まで劣化する可能性のあるものも当然含まれる。このため、調査点検間の異常検知として定置型のモニタリングシステムの役割があると考えられる。その他、補修を施した箇所は損傷が発生しやすい部位とも言えることから、常時監視の必要性が高い対象である。

また、全世界の陸地の0.25%の国土に地震発生数の約15%が集中

する地震国であり、四方を海に囲まれ大規模台風の影響も大きく受ける我が国の構造物では、災害をもたらす大きな外力によって一気に損傷することを考えておかなければならない。これは経年劣化とは異なるものの、居住者の安全を確保するとともに、経済活動への影響を抑えるためには、いつ発生するか予測できない大地震や暴風に対して迅速な構造物の使用の可否、あるいは使用再開の可否を判断することはきわめて重要である。また、前述したように、大地震時に必須となる復旧性・修復性の評価のための構造物の詳細調査への適用に対する期待も大きいと言える。これらのことから、発生を予測することが困難な災害に対する構造物の健全性診断を行うための手段として常時観測を位置づけることができる。

それらに加えて、常時観測によって健全性が正確に分かれれば、すなわち、観測データからの評価・判定が調査点検を基にしたそれと同等になれば、点検作業を省くことができ、維持管理費用を軽減できることに繋がる。そのためには、①観測装置類が調査点検間隔よりも長期の耐久性を持つこと、②常時観測の効果が、同等の結果を得るための定期調査点検・臨時調査点検より低コストであること、③点検作業により構造物に発生した損傷の位置とその程度が分かるため、モニタリングシステムによる観測データからも構造物のどの部位が損傷劣化しているかを推定できること、などの課題をクリアしなければならない。残念ながら、現状ではそのような技術は開発されていないが、膨大なデータを解析する技術が近年飛躍的に発展していることから、今後、常時観測データと構造物データを継続的に蓄積し解析するサイクルを回していくことによって、この技術の構築の可能性は高まると考える。また、常時観測によって、橋であれば落橋、トンネルや斜面であれば崩壊といった構造物の終局状態をより正確に予測、評価できる可能性もあり、そうなれば、安全で安心な社会の構築に大きく貢献するものと考えられる。

III. モニタリング技術の開発事例

1. 土木分野の研究状況

(1) 光ファイバセンサ

光ファイバセンサは、小型軽量・長寿命(錆びない)・高耐電磁ノイズ性・長距離伝送可能などの特長を有することから、建設分野においても適用が進んで久しい。なかでも、分布型光ファイバセンサでは、光ファイバの全長に沿った情報を連続的に得ることができる。これまでに、BOCDA方式分布型光ファイバひずみセンサを開発、モニタリングへの適用を進めてきたので、その一例を紹介する^{1,2)}。

商業施設内の歩道橋にて、2007年の竣工以降、ひび割れ検知モニタリングを実施している(Fig.1)。主桁表面に光ファイバセンサを固定し、主桁全長において耐久性や耐荷性低下の原因となるひび割れがないことを定期的に確認している。主桁に沿ったひずみ分布をBOCDA方式により計測した結果をFig.2に示す。ひび割れに伴う局所的な引張ひずみがみられないことから、これまでにひび割れが発生していないことが確認できている。

本事例では、光ファイバセンサは常設したまま、都度、計測器を設置して定期的にモニタリングを行っている。ひび割れ発生検知や進展の把握を通じて、調査点検の間の常時監視手段として、また将来的には調査点検の代替手段として期待される。



Fig.1 ひび割れ検知モニタリング中の歩道橋
(Pedestrian Deck to be Monitored)

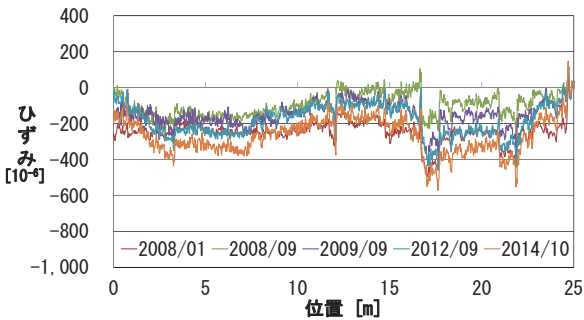


Fig.2 ひずみ分布計測結果
(Measured Strain Distribution)

(2) 画像計測

近年のデジタルカメラや画像処理技術の進歩に伴い、デジタル画像相関法などに代表される光学的全視野計測法の研究が盛んである。これらは、対象物に非接触で広範囲な多点計測が可能であり、建設分野においてもその取り組みが広がっている。ここでは、高速撮影動画によるデジタル画像計測技術を用いて、供用中の橋梁の挙動を把握することを試みた事例を紹介する³⁾。

連続撮影した画像の任意の点における変位の大きさと方向を求める画像計測技術であるデジタル画像相関法を用いて、供用中の橋梁で重量車両通行時に撮影された高速撮影動画(100fps:100 画面/秒)を基にたわみ測定した例を示す。Fig.3 に撮影状況を、計測結果をFig.4 に示す。レーザ距離計と同等の結果を得ることができている。

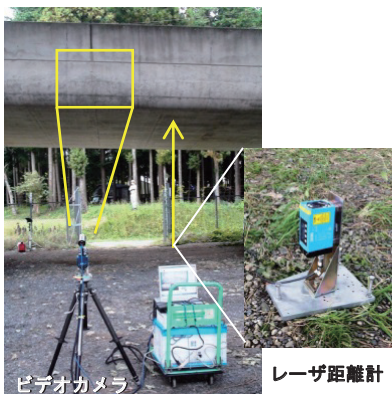


Fig.3 橋における計測
(Setup for Site Measurement)

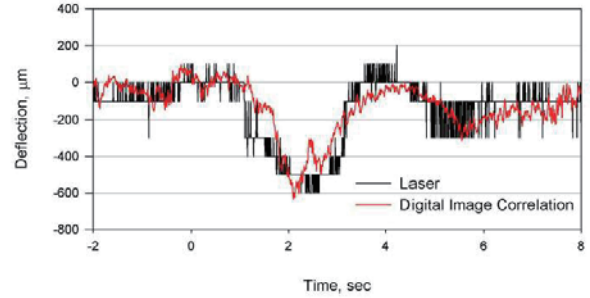


Fig.4 たわみ計測結果
(Measured Deflection)

2. 建築分野の研究状況

地震などにより建物が被災した直後に、その継続使用の可否判断や居住者の緊急避難要否判断と合わせて、仕上げに覆われた部分など目視判断が困難な構造部材の損傷部位とその程度を把握することが、建物の事業者や管理者のニーズとして確認されている。ここでは、建物の構造損傷度の定量評価に直接的かつ明瞭な指標を与える層間変位計測に基づく実用性の高い評価技術を構築し、迅速・正確・簡便に建物の部材損傷状況をリアルタイムに評価提供する実用モニタリングシステムの開発事例⁴⁻⁶⁾を示す。

(1) センシング技術：光学式層間変位センサ

地震などの外乱に対する建物の健全性評価において、建物の変位情報は直接的かつ明瞭な指標となりうる。特に、建物の耐震設計において、地震時の層間変位は重要な設計指標であり、それを計測することにより地震に対する建物の損傷を詳細に検出できる可能性がある。そこで、地震時の建物の層間変位を高精度かつ簡便に直接計測することを目的として、光位置検出素子 (Position Sensitive Detector: PSD) を用いた非接触型の光学式層間変位センサを早稲田大学と共同で開発した。センサの模式図をFig.5 に示す。

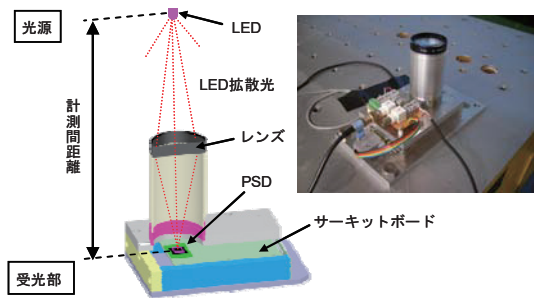


Fig.5 光学式層間変位センサの模式図
(Schematic of Optical Relative Story Displacement Sensor)

次に、実建物(鹿島技研西調布実験場21号館制御棟)の起振機加振試験の計測結果をFig.6に示す。本建物の各層にはKブレースと梁との間に油封式の制震装置が設置されており、制震装置をロック/アンロックすることで、ブレースと梁を結合/離間することができる。本試験では、アンロック状態で加振中にロック状態に切り替えることにより、損傷を模擬した微小な残留層間変位を与えた。光学式層間変位センサは、残留層間変位を検出できていることが分かる。

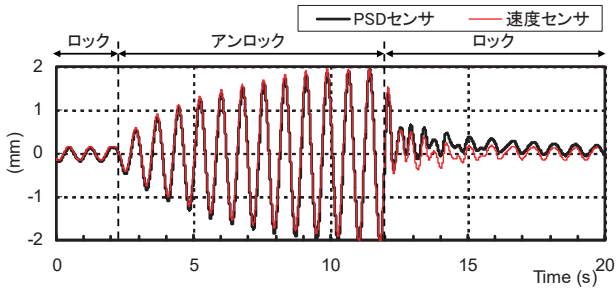


Fig.6 残留層間変位の計測
(Measurement of Residual Relative Story Displacement)

(2) 健全性評価技術：部材損傷評価法

リアルタイム計測された層間変位を用いて建物健全性の即時評価を行うため開発した損傷評価法は、建物の骨組モデルを用いて、計測された層間変位時刻歴波形による変位載荷解析を行い、地震時の建物全体挙動をトレースすることで建物主架構部材の挙動を推定するもので、建物の損傷部位とその程度を提示することができる。文科省E-ディフェンス実験（18層S造）において、光学式層間変位センサによる計測直後に本手法により評価した部材損傷状況の画像例をFig.7に示す。本評価では、梁の破断損傷度（ >0 で降伏、 ≥ 1 で破断）を損傷指標として採用した。実験後の試験体観察により、本損傷評価法が部材の損傷状況を精度よく推定できていることが確認されている。

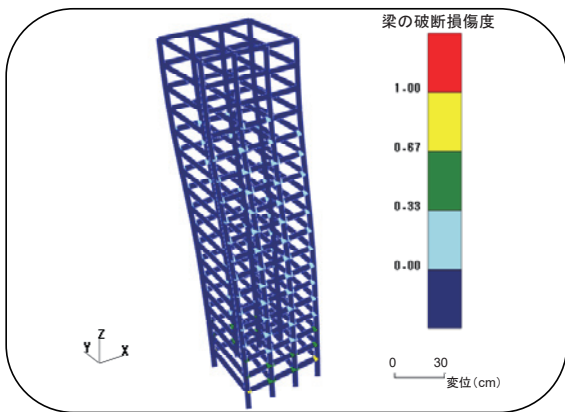


Fig.7 アニメーション画像例
(Animation Image Example)

IV. おわりに

サステナブルな社会インフラの実現に必須と考えられるインフラ維持管理に対する点検・モニタリング技術の役割、必要性和、研究開発中の土木、建築分野の代表的な技術の概要について報告した。

インフラ構造物の維持管理は、モニタリング技術、健全性評価技術、修繕等対策技術で構成されており、機械・電気分野から土木建築の構造分野、さらにはリスク分析に関連する社会工学分野に至る様々な分野の知識が組み合わさって成り立っている。したがって、本技術の開発や実用化・普及を進めようとする場合、異分野の専門家、あるいはユーザー側とのコラボレーションも視野に入れて推進していくことが肝要となると考える。

参考文献

- 1) M. Imai, R. Nakano, T. Kono, T. Ichinomiya, S. Miura and M. Mure : Crack detection application for fiber reinforced concrete using BOFDA-based optical fiber strain sensor, Journal of structural engineering , 136(8) , 2010, pp.1001-1008.
- 2) 今井道男：分布型光ファイバセンサによるコンクリート構造物の長期ひび割れモニタリング, 電子情報通信学会論文誌 C, 99(3), 2016, pp.45-50.
- 3) 今井道男, 太田雅彦, 露木健一郎, 今井浩, 三浦悟, 村田一仁, 高田巡：高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集 A1, 72(1), 2016, pp.279-289.
- 4) 畑田朋彦, 高橋元一, 鈴木康嗣, 松谷巖, 金川清, 仁田佳宏, 西谷章：起振機加振試験による非接触型センサを利用した実建物の層間変位計測, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第653号, 2010.7, pp.1257-1264.
- 5) 畑田朋彦, 片村立太, 萩原一, 高橋元一, 仁田佳宏, 西谷章：層間変位計測に基づいた損傷評価法の実大建物震動台実験データを用いた検証, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第686号, 2013.4, pp.703-711.
- 6) T. Hatada, R. Katamura, H. Hagiwara, Y. Nitta, T. Tani and A. Nishitani : "Verification of Damage Monitoring and Evaluation Method for High-rise Buildings based on Measurement of Relative Story Displacements in E-Defense Shaking Table Test", Proceedings of the 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, 2014.7.